

УДК 537.877 + 550.837.31+551.510.535

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА В ИОНОСФЕРУ ОТ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЗАЗЕМЛЕННОГО ДИПОЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЭРГУ-600-2 (СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)

© 2025 г. В. М. Сорокин<sup>1</sup>, А. К. Яценко<sup>1</sup>, В. А. Новиков<sup>2,3,\*</sup>,  
С. А. Имашев<sup>4</sup>, Е. А. Лазарева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Научная станция РАН в Бишкеке, Бишкек, Кыргызстан

\*E-mail: novikov@ihed.ras.ru

Исследован физический механизм распространения возмущения электромагнитного поля, генерируемого электроразведочной генераторной установкой ЭРГУ-600-2, расположенной на Бишкекском геодинамическом полигоне Научной станции РАН в Бишкеке (Кыргызстан), в нижнюю ионосферу. В рамках упрощенной модели среды и источника излучения (заземленный диполь, запитываемый установкой ЭРГУ-600-2) получены аналитические выражения для частотных и пространственно-временных распределений компонент электромагнитного поля. Результаты расчетов показывают, что амплитуда возмущения электрического поля в УНЧ диапазоне на высоте 70–100 км достигает единиц мкВ/м. Расчетная амплитуда магнитного поля на поверхности Земли в месте расположения излучающего диполя составляет единицы пТл. Для верификации численных результатов на территории Бишкекского геодинамического полигона выполнены полевые измерения полного вектора геомагнитного поля на различном расстоянии от излучающего диполя во время сеансов работы установки ЭРГУ-600-2. Полученные результаты полевых измерений согласуются с результатами расчетных исследований, что позволяет использовать предложенную расчетную методику для оценки электромагнитного загрязнения окружающей среды при работе техногенных источников типа системы ЭРГУ-600-2 + диполь.

**Ключевые слова:** электроразведочная установка, заземленный излучающий диполь, электромагнитное поле, ионосфера, полный вектор геомагнитного поля.

**Для цитирования:** Сорокин В.М., Яценко А.К., Новиков В.А., Имашев С.А., Лазарева Е.А. Распространение электромагнитного сигнала в ионосферу от излучающего заземленного диполя электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2 (Северный Тянь-Шань) // Динамические процессы в геосферах. Т. 17. № 2. С. 41–53. [https://doi.org/10.26006/29490995\\_2025\\_17\\_2\\_41](https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_41)

### Введение

С учетом стремительного технологического развития в последние годы все большее значение приобретают исследования электромагнитного (ЭМ) загрязнения окружающей среды, то есть совокупности ЭМ полей различной частоты, создаваемого природными и антропогенными источниками, которое может негативно влиять на работу различных технических устройств и здоровье человека. Особый интерес представляют исследования распространения ЭМ излучения УНЧ-диапазона в ионосферу, обзор которых для ЭМ воздействия наземных линий электропередач (ЛЭП) на околосреднее пространство представлен в работе [Пилипенко и др., 2021]. Отмечается, что при пролете микроспутников Чибис-М и DEMETER на высоте 513 и 660...710 км соответственно, над протяженными ЛЭП, амплитуда тока в которых составляла 8–10 А, на частоте 50/60 Гц регистрировалось электрическое поле порядка 1 мкВ/м [Корепанов и др., 2015]. Кроме того, в обзоре

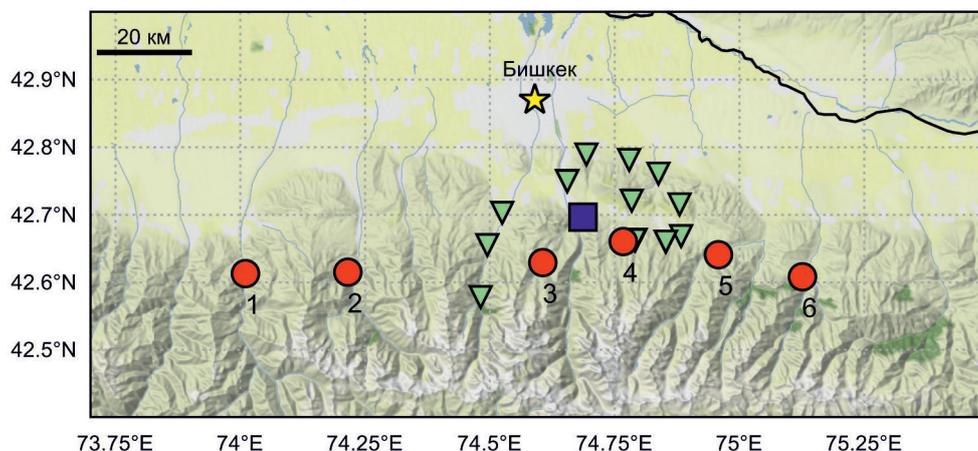
результатов спутниковых наблюдений [Пилипенко и др., 2021] сделан вывод о том, что интенсивность излучения ЛЭП в околосземном пространстве оказывается выше интенсивности таких природных излучений, как шумановские резонансы и ионные свисты. При этом такая интенсивность продолжает нарастать, что связано с технологическим развитием земной цивилизации. Кроме излучения ЛЭП, в работах [Федоров и др., 2022; Fedorov et al., 2023] теоретически рассмотрена генерация возмущения ЭМ поля в ионосфере, создаваемого установкой ЗЕВС. Источник представляет собой горизонтальную заземленную антенну длиной  $l = 60$  км с гармоническим током с амплитудой  $I = 200$  А и частотой 82 Гц. При этом дипольный момент источника равен  $I \times l = 1.2 \cdot 10^7$  А·м. Узкополосное ЭМ излучение с частотой 82 Гц от установки ЗЕВС регистрировалось в ионосфере как при пролете спутника DEMETER [Parrot et al., 2018] на высоте 660 км, так и спутника CSES на высоте около 500 км [Pilipenko et al., 2019].

Наряду со спутниковыми наблюдениями развиваются и теоретические методы изучения данного явления. Так, в работе [Пилипенко и др., 2021] было проведено численное моделирование излучения бесконечно протяженной ЛЭП с гармоническим током с частотой 50 Гц и амплитудой 10 А. Численное моделирование показало, что в ЛЭП несбалансированные токи интенсивностью  $\sim 10$  А возбуждают электрическое поле с амплитудой  $\sim 1$  мкВ/м, достаточной для обнаружения электрическими датчиками низкоорбитальных спутников в верхней ночной ионосфере. В работах [Федоров и др., 2022; Fedorov et al., 2023; Пилипенко и др., 2024] рассмотрена генерация возмущения электромагнитного поля в ионосфере установкой ЗЕВС. Смоделирована скорость утечки энергии КНЧ-волны в верхнюю ионосферу от осциллирующего линейного тока с частотой 82 Гц бесконечной длины, протекающего над электропроводным слоем земли. Полученные расчетные значения амплитуды и поляризация ЭМ-отклика верхней ионосферы находятся в соответствии со свойствами излучения, зарегистрированного спутником DEMETER.

В данной работе рассмотрена модель распространения ЭМ-сигнала в ионосферу от заземленного излучающего диполя электроразведочной генераторной установки ЭРГУ-600-2, расположенной на Бишкекском геодинимическом полигоне Научной станции РАН (Кыргызстан, Северный Тянь-Шань) и предназначенной для проведения режимных электромагнитных зондирований земной коры.

### Электроразведочная генераторная установка ЭРГУ-600-2

Электроразведочная генераторная установка ЭРГУ-600-2 расположена в центральной части Бишкекского геодинимического полигона (рис. 1) и предназначена для глубинного зондирования земной коры [Волыхин и др., 1993; Бобровский и др., 2023; Имашев, Рыбин, 2023], а также проведения специальных полевых экспериментов по активному электрическому воздействию на литосферу



**Рис. 1.** Схема расположения излучающего диполя установки ЭРГУ-600-2 (синий квадрат) и пунктов геомагнитных наблюдений на территории Бишкекского геодинимического полигона (БГП). Стационарные станции геомагнитного мониторинга: 1 – Ак-Суу, 2 – Шавай, 3 – Чункурчак, 4 – Таш-Башат, 5 – Иссык-Ата, 6 – Кегеты (красные кружки). Передвижные пункты регистрации геомагнитного поля вокруг излучающего диполя обозначены зелеными треугольниками

[Сычев и др., 2010]. Она включает в себя генераторную установку, которая осуществляет преобразование электрической энергии первичного источника в последовательность импульсов тока, и нагрузку, в качестве которой используется заземленный диполь-излучатель длиной  $l = 4200$  м, ориентированный в направлении север-юг. Амплитуда тока в источнике достигает  $I_0 = 600$  А. Временные параметры последовательности импульсов тока, подаваемых в диполь: длительность импульса  $t_u = 0.1 \dots 1000$  с; пауза между импульсами  $0.07 \dots 1000$  с; длительность переднего фронта импульса  $t_{\phi} \leq 0.06$  с, заднего фронта  $-t_c \leq 0.02$  с. Дипольный момент источника равен  $I_0 \times l = 2.52 \cdot 10^6$  А·м.

Таким образом, характерная частота излучателя  $1/t_c \geq 50$  Гц по порядку величины соответствует частоте тока в ЛЭП и в установке ЗЕВС. При этом дипольный момент источника в 4 раза меньше, чем для установки ЗЕВС. Прямое сравнение интенсивностей излучателя для ЭРГУ-600-2 и ЛЭП невозможно в связи с различием в типах источника (бесконечная линия и диполь конечной длины). Однако максимальный ток в импульсе установки ЭРГУ-600-2 (600 А) в десятки раз превышает ток в ЛЭП (10 А).

Для решения вопроса о возможности проникновения электромагнитного возмущения от установки ЭРГУ-600-2 на высоты ионосферы была рассмотрена математическая модель источника электромагнитного возмущения и среды, в котором оно распространяется.

### Математическая модель распространения электромагнитного сигнала в ионосферу от излучающего диполя установки ЭРГУ-600-2

Рассмотрим двухслойную плоскостойкую проводящую среду, состоящую из земной коры и атмосферы. Выберем декартову систему координат  $(x, y, z)$  с началом на поверхности Земли и с осью  $z$ , направленной вертикально вверх от поверхности Земли в атмосферу. Проводимость земной коры  $\sigma_g$  постоянна, а проводимость атмосферы  $\sigma_a$  зависит только от высоты над поверхностью Земли. Обе проводимости изотропны. В качестве модели проводимости атмосферы выберем экспоненциальную зависимость с характерным масштабом  $h$  [Volland, 1984]:

$$\sigma_a(z) = \sigma_0 \exp(z/h). \quad (1)$$

Параметры этой зависимости в диапазоне высот  $0 \dots 80$  км аппроксимируем величинами  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-14}$  Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ ,  $h = 5 \cdot 10^3$  м. Предлагаемая модель не учитывает эффекта замагниченности ионосферной плазмы, который начинает влиять на высотах более  $70 \dots 80$  км. Выше этой высоты поперечные компоненты электрического и магнитного полей переносятся вдоль направления геомагнитного поля без изменения. Можно предположить, что предлагаемая упрощенная модель описывает распространение электромагнитного возмущения до высот  $h_m \sim 70 \dots 80$  км, а на больших высотах возмущение по порядку величины такое же, как и на высоте  $h_m$ .

В качестве источника возмущения выберем горизонтально ориентированный сторонний ток  $\mathbf{j}_s$  с поверхностной плотностью  $\mathbf{J}_s$ , сосредоточенный на поверхности Земли:

$$\mathbf{j}_s(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}_s(\mathbf{r}_h, t) \delta(z), \quad (2)$$

где  $\delta(z)$  – дельта-функция, а индексом  $h$  обозначим горизонтальные компоненты векторов:  $\mathbf{r}_h = (x, y)$ . В установке ЭРГУ-600-2 источник представляет из себя линейный горизонтальный элемент (диполь) длиной  $l$  с силой тока  $I$ . На расстояниях от источника до точки наблюдения  $r \gg l$  этот ток можно считать коротким и применимо приближение точечного источника:

$$\mathbf{J}_s = P \delta(x) \delta(y) \mathbf{e}_x; P = I \cdot l. \quad (3)$$

Сначала выполним вычисления, пригодные для произвольного горизонтального тока вида (2). Электрическое поле в Земле и атмосфере определяется из уравнения [Bladel, 2007]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_s}{\partial t}. \quad (4)$$

В уравнении (4) выполним преобразования Фурье по времени и горизонтальным координатам:  $\partial/\partial t \rightarrow -i\omega$ ,  $\nabla_h \rightarrow ik$ . Получим:

$$\frac{d^2 \mathbf{E}_h}{dz^2} - q^2 \mathbf{E}_h + \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_h) - ik \frac{dE_z}{dz} = -i\omega\mu_0 \mathbf{j}_s, \quad E_z = -\frac{i}{q^2} \frac{d}{dz} (\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_h), \quad q^2 = k^2 - i\omega\mu_0(\sigma - i\omega\varepsilon_0). \quad (5)$$

В уравнении (5) сделаем замену переменных:

$$U = \mathbf{k} \cdot \mathbf{E}_h = k_x E_x + k_y E_y, \quad W = (\mathbf{k} \times \mathbf{E}_h)_z = k_x E_y - k_y E_x, \quad (6)$$

$$E_x = (k_x U - k_y W) / k^2, \quad E_y = (k_y U + k_x W) / k^2, \quad E_z = -i \frac{dU}{dz} / q^2.$$

Из уравнения (5) получим следующие выражения:

$$\frac{d^2 W}{dz^2} - q^2 W = 0, \quad \frac{d^2 U}{dz^2} + \frac{k^2}{q^2} \frac{\sigma'_a}{\sigma_a - i\omega\varepsilon_0} \frac{dU}{dz} - q^2 U = 0. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7) вблизи  $z = 0$ , получим следующие граничные условия:

$$\{U\} = \{W\} = 0, \quad (8)$$

$$\left\{ \frac{dU}{dz} \right\} - k^2 \left\{ \frac{1}{q^2} \frac{dU}{dz} \right\} = -i\omega\mu_0 R_1, \quad \left\{ \frac{dW}{dz} \right\} = -i\omega\mu_0 R_2, \quad R_1 = (\mathbf{k} \cdot \mathbf{J}_s), \quad R_2 = (\mathbf{k} \times \mathbf{J}_s)_z,$$

где фигурными скобками  $\{\dots\}$  обозначен скачок соответствующей величины при переходе через границу Земля-атмосфера.

В земной коре  $z < 0$

$$\frac{d^2}{dz^2} \begin{pmatrix} U \\ W \end{pmatrix} - q_g^2 \begin{pmatrix} U \\ W \end{pmatrix} = 0, \quad (9)$$

где  $q_g^2 = k^2 - i\omega\mu_0\sigma_g - \omega^2/c^2 \approx k^2 - i\omega\mu_0\sigma_g$  для частот  $f \ll \sigma/\varepsilon_0 \sim 10$  МГц.

Найти аналитическое решение уравнений (7) даже для простейшего профиля проводимости (1) не представляется возможным. Но их можно упростить. Рассмотрим выражение для  $q_a^2 = k^2 - i\omega\mu_0\sigma_a - \omega^2/c^2$ . При  $\omega \leq 10^2 \text{ с}^{-1}$ ,  $k \geq 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  выполняется неравенство  $k^2 \gg \omega^2/c^2$  и до высот порядка 70...80 км  $k^2 \gg \omega\mu_0\sigma_a$ , что означает пренебрежение индукционными эффектами. Следовательно, в пределах этих высот  $q^2 \approx k^2$  и уравнения для  $U$ ,  $W$  примут вид:

$$\frac{d^2 W}{dz^2} - k^2 W = 0, \quad \frac{d^2 U}{dz^2} + \frac{\sigma'_a}{\sigma_a - i\omega\varepsilon_0} \frac{dU}{dz} - k^2 U = 0. \quad (10)$$

Первое из уравнений (10) имеет решения  $\sim \exp(\pm kz)$ , а второе заменой переменной  $t = \exp(-z/h)$  преобразуется к виду:

$$t^2 (1 - ipt) \frac{d^2 U}{dt^2} - ipt^2 \frac{dU}{dt} - q^2 (1 - ipt) U = 0, \quad q = kh, \quad p = \varepsilon_0 \omega / \sigma_0. \quad (11)$$

Два линейно-независимых решения последнего уравнения выражаются через гипергеометрические функции и в исходных переменных имеют вид [Зайцев, Полянин, 1995]:

$$f_{1,2}(z) = e^{-q_{1,2}z} \frac{{}_2F_1\left(q_{1,2} - q, q_{1,2} + q, 2q_{1,2}, ipe^{-\frac{z}{h}}\right)}{2F_1(q_{1,2} - q, q_{1,2} + q, 2q_{1,2}, ip)}, \quad q_{1,2} = \frac{1}{2h} \left(1 \pm \sqrt{1 + 4q^2}\right), \quad f_{1,2}(0) = 1. \quad (12)$$

Убывающим при  $z \rightarrow \infty$  является решение с индексом 1. Приближенное решение системы (7) примет вид:

$$z < 0 \quad W = W_0 \exp(q_g z), U = U_0 \exp(q_g z); \quad z > 0 \quad W = W_0 \exp(-kz), U = U_0 f_1(z). \quad (13)$$

Подставив (13) в граничные условия (8), и переходя к исходным переменным  $E_{x,y,z}$ , получим при  $z > 0$ :

$$E_x = -\frac{P}{\sigma_g} \frac{k_x^2 q f_1(z) - k_y^2 (k - q) \exp(-kz)}{k^2}, \quad E_y = -\frac{P}{\sigma_g} \frac{k_x k_y [q f_1(z) + (k - q) \exp(-kz)]}{k^2}, \quad (14)$$

$$E_z = i \frac{P}{\sigma_g} \frac{k_x q}{k^2} f_1'(z).$$

Компоненты магнитного поля:

$$B_x = i \frac{P}{\sigma_g} \frac{k_x k_y (k - q)}{k \omega} \exp(-kz), \quad B_y = i \frac{P}{\sigma_g} \frac{k_y^2 (k - q)}{k \omega} \exp(-kz), \quad B_z = -\frac{P}{\sigma_g} \frac{k_y (k - q)}{\omega} \exp(-kz). \quad (15)$$

Пространственно-временные распределения компонент электромагнитного возмущения определяются путем обратных преобразований выражений (14) и (15). Переходя в цилиндрическую систему координат  $r, \theta, z$ , и производя интегрирования [Gradshteyn et al., 2007] получим пространственные распределения компонент электрического и магнитного полей в атмосфере, генерируемых монохроматическим источником  $P \exp(-i\omega t)$ :

$$E_r(r, \theta, z) = \frac{P \cos \theta}{4\pi\sigma_g} \left\{ \int_0^\infty [q f_1(z) + (k - q) \exp(-kz)] J_2(kr) k dk - \int_0^\infty [q f_1(z) - (k - q) \exp(-kz)] J_0(kr) k dk \right\},$$

$$E_\theta(r, \theta, z) = \frac{P \sin \theta}{4\pi\sigma_g} \left\{ \int_0^\infty [q f_1(z) + (k - q) \exp(-kz)] J_2(kr) k dk + \int_0^\infty [q f_1(z) - (k - q) \exp(-kz)] J_0(kr) k dk \right\}, \quad (16)$$

$$E_z(r, \theta, z) = -\frac{P}{2\pi\sigma_g} \cos \theta \int_0^\infty q f_1'(z) J_1(kr) dk.$$

Компоненты магнитного возмущения:

$$B_r(r, z, \theta) = \frac{iP \sin(\theta)}{2\pi\sigma_g \omega} \int_0^\infty k^2 (k - q) \exp(-kz) [J_0(kr) - J_2(kr)] dk,$$

$$B_\theta(r, z, \theta) = \frac{iP \cos(\theta)}{2\pi\sigma_g \omega} \int_0^\infty k^2 (k - q) \exp(-kz) [J_0(kr) + J_2(kr)] dk, \quad (17)$$

$$B_z(r, \theta, z) = -\frac{iP \sin(\theta)}{2\pi\sigma_g \omega} \int_0^\infty (k - q) k^2 \exp(-kz) J_1(kr) dk.$$

При расчете магнитных возмущений вблизи поверхности Земли, в районе установки ЭРГУ-600-2, приближение точечного источника непригодно и вместо (15) следует использовать выражения:

$$B_x = i \frac{J_s(\mathbf{k}) k_x k_y (k-q)}{\sigma_g k \omega} \exp(-kz), \quad B_y = i \frac{J_s(\mathbf{k}) k_y^2 (k-q)}{\sigma_g k \omega} \exp(-kz),$$

$$B_z = - \frac{J_s(\mathbf{k}) k_y (k-q)}{\sigma_g \omega} \exp(-kz), \quad (18)$$

где  $J_s(\mathbf{k})$  – Фурье-образ пространственного распределения поверхностного тока (2). Для линейного горизонтального элемента тока с силой  $I$  и длиной  $l$  он имеет вид:

$$J_s(\mathbf{k}) = I l \operatorname{sinc}(k_x l / 2), \quad (19)$$

где  $\operatorname{sinc}(t) = \sin t/t$ . В этом случае пространственные распределения компонент магнитного возмущения не удастся свести к однократным квадратурам, аналогичным (17). Расчеты производились методом двумерного обратного преобразования Фурье с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

### Результаты численных исследований

Произведем расчеты компонент электрического поля по формулам (16). На рис. 2 представлены результаты расчета высотного распределения компонент  $E_r$ :  $r = 0$ ,  $\theta = 0$ ;  $E_\theta$ :  $r = 30$  км,  $\theta = \pi/2$ ;  $E_z$ :  $r = 30$  км,  $\theta = 0$  для источника с частотой  $f = 1$  Гц.

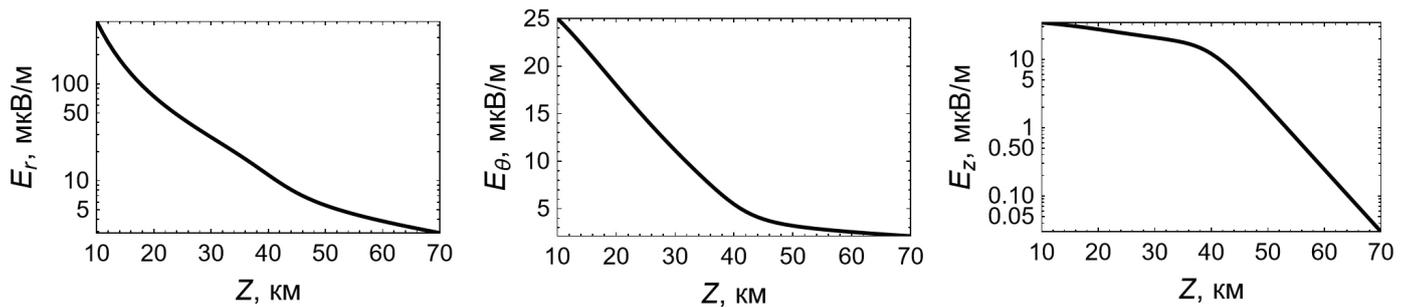


Рис. 2. Зависимость компонент электрического поля от высоты  $z$

Результаты расчетов показывают, что амплитуда горизонтальных компонент поля на высоте 70 км достигает единиц мкВ/м, а вертикальной – сотых долей мкВ/м, что, по всей вероятности, сложно экспериментально зарегистрировать. На рис. 3 представлены радиальные зависимости компонент  $E_r$ :  $z = 70$  км,  $\theta = 0$  (левая панель) и  $E_\theta$ :  $z = 70$  км,  $\theta = \pi/2$  (правая панель) при  $f = 1$  Гц (сплошная линия) и  $f = 10$  Гц (пунктир).

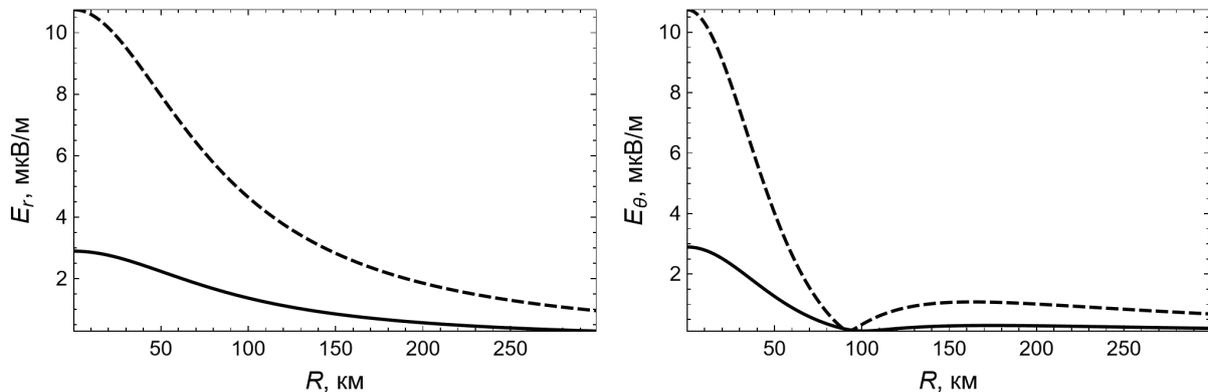


Рис. 3. Радиальные зависимости компонент электрического поля от высоты  $z$

Амплитуда радиальной компоненты достигает 10 мкВ/м, азимутальной – 2.5 мкВ/м, причем обе они растут с частотой. На рис. 4 представлена зависимость радиальной компоненты электрического поля  $E_r$ :  $z = 70$  км,  $r = 0$ ,  $\theta = 0$  от частоты. Эта зависимость приблизительно следует закону  $\sim \sqrt{f}$ .

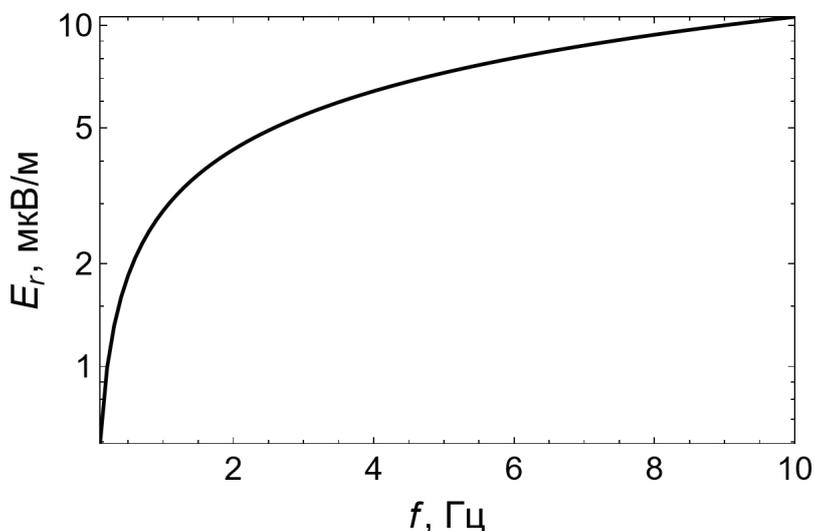


Рис. 4. Зависимость радиальной компоненты электрического поля от частоты

На рис. 5 изображены пространственные зависимости компонент магнитного поля на поверхности Земли на частоте 1 Гц от  $y$  при  $x = 5$  км, т.е. перпендикулярно направлению тока (левая панель) и от  $x$  при  $y = 5$  км – параллельно направлению тока (правая панель). Сплошная, штриховая и пунктирная линии соответствуют компонентам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Амплитуды компонент магнитного возмущения достигают 5...7 нТл, а их пространственные масштабы – порядка 10 км.

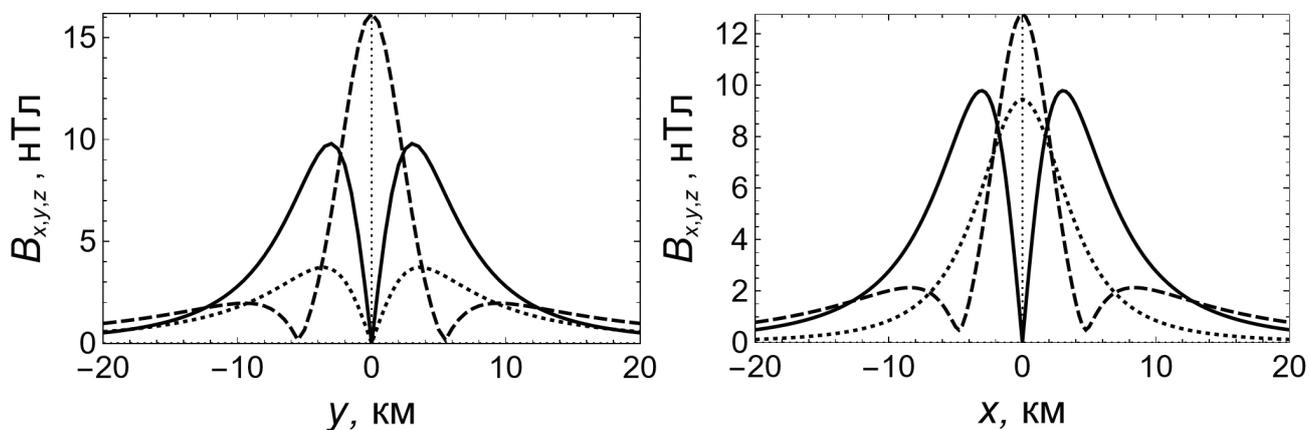
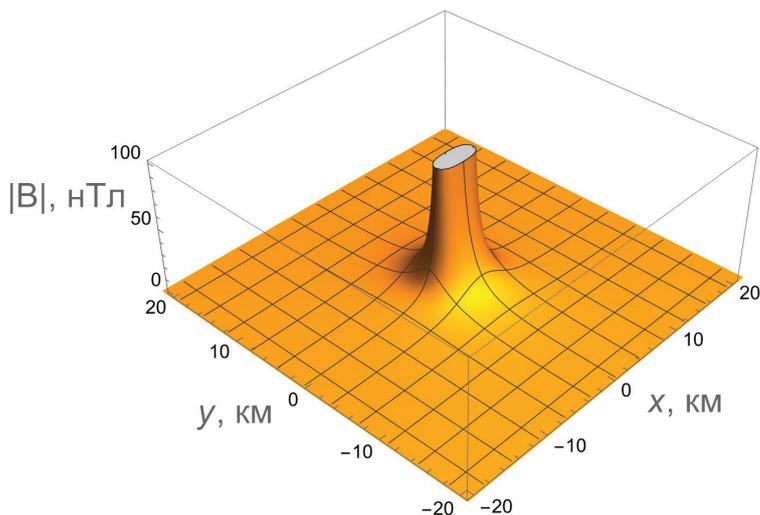


Рис. 5. Пространственные зависимости компонент магнитного поля на поверхности Земли на частоте 1 Гц от  $y$  при  $x = 5$  км, т.е. перпендикулярно направлению тока (левая панель) и от  $x$  при  $y = 5$  км – параллельно направлению тока (правая панель)

Результаты расчетов пространственного распределения абсолютной величины магнитного возмущения вблизи поверхности Земли для протяженного источника приведены на рис. 6. Для того, чтобы исключить особенности при пересечении источника, расчеты производились, начиная с высоты  $z = 20$  м над поверхностью Земли.

Выше были получены выражения для компонент электромагнитного поля, генерируемого источником с гармонической зависимостью от времени. Для временной зависимости дипольного момента источника  $P(t)$  в виде периодической последовательности импульсов с периодом  $T$ ,



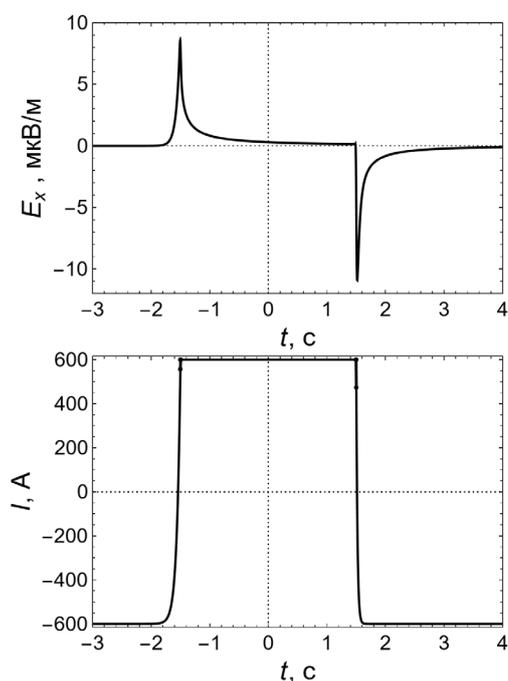
**Рис. 6.** Пространственное распределение абсолютной величины магнитного возмущения вблизи поверхности Земли для протяженного источника

характерной для установки ЭРГУ-600-2, временная зависимость компонент электромагнитного возмущения, выражается в виде разложения в ряд Фурье, коэффициенты которого определяются решениями (14) и (15) для монохроматического источника и Фурье-образом импульса на частотах  $2\pi n/T$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Опуская выкладки, приведем результат расчета для последовательности импульсов модельного вида:

$$F(t) = I_0 \begin{cases} \exp[(t + 0.5t_u)/t_\phi], & t < -0.5t_u \\ 1, & -0.5t_u < t < 0.5t_u \\ \exp[-(t - 0.5t_u)/t_c], & t > 0.5t_u \end{cases}.$$

Параметры импульса  $F(t)$  выберем соответствующими параметрам излучателя установки ЭРГУ-600-2:  $t_u = 3c$ ,  $T = 9c$ ,  $t_\phi = 0.06c$ ,  $t_c = 0.02c$ .

На рис. 7 приведена рассчитанная временная зависимость компоненты электрического поля  $E_x$  вдоль направления диполя при  $x = y = 0$ ,  $z = 70$  км для сравнения вместе с временной зависимостью тока в источнике.



**Рис. 7.** Временные зависимости тока в источнике (верхняя панель) и компоненты электрического поля  $E_x$  вдоль направления диполя, при  $x = y = 0$ ,  $z = 70$  км

Из результатов расчетов видно, что электрическое поле представляет из себя последовательность импульсов чередующейся полярности с амплитудами 9 и 11 мкВ/м и длительностью около 0.5–1.0 с.

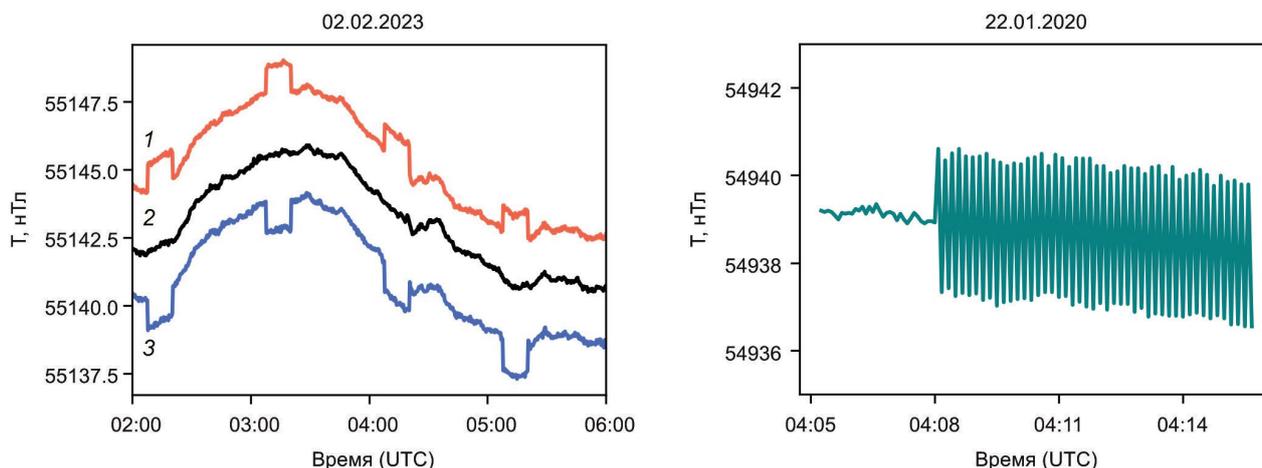
### Экспериментальная верификация расчетной модели по результатам измерения геомагнитного поля во время сеансов работы установки ЭРГУ-600-2

Режимные мониторинговые измерения модуля вариации геомагнитного поля проводятся на Научной станции РАН с 1994 г. В измерительную сеть входят 7 стационарных и 13 передвижных пунктов наблюдений (рис. 1, пункт Карагай-Булак на карте не показан). Для измерения магнитного поля и его вариаций используется магнитовариационная модульная станция МВ-07, действующая по принципу ядерного резонанса, а также магнитометр POS-1, основанный на эффекте Оверхаузера.

Проявление сеансов электромагнитного зондирования земной коры с использованием установки ЭРГУ-600-2 в геомагнитном поле рассмотрено в работе [Лазарева, Имашев, 2021], где было показано, что во время пусков ЭРГУ-600-2 в вариациях полного вектора геомагнитного поля возникают аномальные отклонения от естественного суточного хода. Определяющим фактором при этом являлось расстояние между пунктом наблюдения и питающим диполем. Установка ЭРГУ-600-2 создает электрический ток в питающем диполе, формируя вокруг него магнитное поле, которое накладывается на локальное геомагнитное поле, измеряемое в конкретной точке пространства вокруг питающего диполя.

Аномальные отклонения выделялись на основе процедуры расчета разности между наблюдениями на данной станции и базовой станции Ак-Суу. При этом предполагается, что величина главного магнитного поля и суточной  $S_q$  вариации одинаково проявляется на двух близкорасположенных станциях, что дает основание исключить их вычислением разности показаний.

При анализе данных стационарных пунктов было выявлено, что наибольшие уровни отклонения геомагнитного поля от суточного хода во время сеансов ЭРГУ-600-2 регистрировались на двух станциях – Чункурчак и Таш-Башат, которые ближе всего расположены к питающему диполу (рис. 8, левая панель). Для наглядности и совмещения графиков значения на станциях Чункурчак и Таш-Башат были смещены на  $-174$  и  $+36$  нТл соответственно.



**Рис. 8.** Результаты регистрации магнитного поля на стационарных (левая панель, пункты наблюдения: 1 – Чункурчак, 2 – Ак-Суу, 3 – Таш-Башат) и передвижном (правая панель: пункт Норуз) пунктах во время сеансов работы ЭРГУ-600-2

Аномальные отклонения в измерениях полного вектора геомагнитного поля на стационарных пунктах выглядят как прямоугольные всплески амплитуды, соответствующие по времени сеансам пусков ЭРГУ-600-2. На передвижных пунктах (рис. 8, правая панель) различие в форме аномалий обусловлено частотой дискретизации 5 с, тогда как на стационарных пунктах измерения выполняются каждые 20 с.

Дополнительно был проведен аналогичный анализ хода геомагнитного поля во время сеансов ЭРГУ-600-2 на экспериментальных передвижных пунктах (рис. 1, зеленые треугольники). Применяя аналогичную процедуру выделения пилообразных аномалий, связанных с сеансами электрозондирования, были проведены оценки уровня их амплитуд. На рис. 9 представлены результаты изменения уровня магнитного поля, создаваемого ЭРГУ-600-2, в зависимости от расстояния от наблюдательных пунктов (включая стационарные, передвижные и дополнительные экспериментальные пункты) до питающего диполя (красные точки) в сравнении с результатами расчета (сплошная кривая). В эксперименте измерялся модуль полного магнитного поля  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1$ , где  $\mathbf{B}_{0,1}$  – невозмущенное геомагнитное поле и его возмущение установкой ЭРГУ-600-2. Вычислялась абсолютная величина возмущения полного поля

$$\tilde{B} = \left| \sqrt{(\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1)^2} - B_0 \right| = \left| \sqrt{B_0^2 + 2\mathbf{B}_1\mathbf{B}_0 + B_1^2} - B_0 \right| \approx \left| \mathbf{e}_b \mathbf{B}_1 + \frac{B_1^2}{2B_0} \right| \approx |\mathbf{e}_b \mathbf{B}_1|,$$

так как  $B_1 \ll B_0$ ;  $\mathbf{e}_b = \mathbf{B}_0/B_0$  – единичный вектор в направлении геомагнитного поля. Очевидно, что всегда  $B < B_1$ . Возможно, что это объясняет расхождение между наблюдаемым магнитным возмущением и  $B_1$ . Для расчета  $\tilde{B}$  надо знать наклонение и склонение геомагнитного поля  $I, D$  на широте  $43^\circ$  и долготе  $75^\circ$  источника и его ориентацию  $\varphi$  относительно географического меридиана. В системе координат  $(x, y, z)$ , выбранной в данной работе, получим

$$e_{bx} = \cos I \cos(\varphi \pm D), \quad e_{by} = \cos I \sin(\varphi \pm D), \quad e_{bz} = -\sin I, \quad \tilde{B} = \left| e_{bx} B_{1x} + e_{by} B_{1y} + e_{bz} B_{1z} \right|.$$

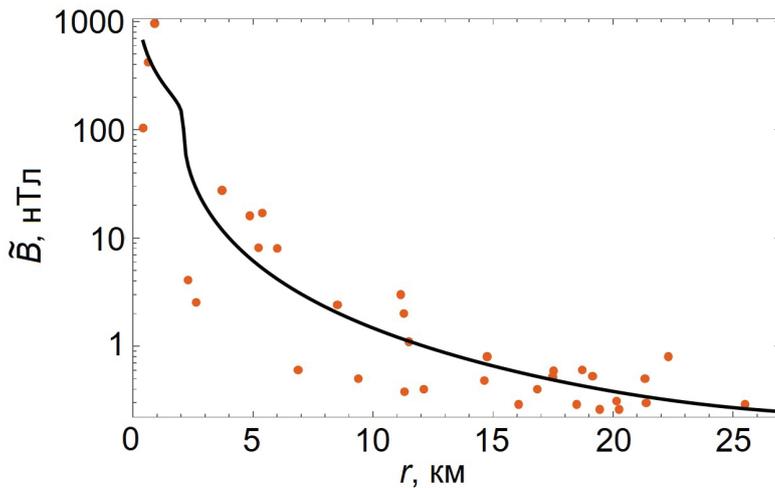


Рис. 9. Зависимость среднего (по направлению на точку наблюдения) расчетного значения величины  $\tilde{B}$  от расстояния до центра диполя (сплошная линия) и измеренных амплитуд магнитного возмущения на различных магнитометрических станциях (красные точки)

Согласно модели IGRF [Alken et al., 2021],  $B_0 = 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ Т}$ ,  $I = 64^\circ$ ,  $D = 5^\circ$  и горизонтальная компонента  $\mathbf{B}_0$  повернута в восточном направлении. Так как  $D$  мало, то

$$e_{bx} = \cos I \cos \varphi, \quad e_{by} = \cos I \sin \varphi, \quad e_{bz} = -\sin I,$$

где  $\varphi$  – это угол между направлением на север и ориентацией источника ЭРГУ-600-2. Так как источник ориентирован приблизительно вдоль географического меридиана, то  $\varphi \approx 0$  и  $\tilde{B} = |B_x \cos I - B_z \sin I|$ .

### Заключение

Результаты расчетов для монохроматического и импульсного периодических источников с параметрами, соответствующими установке ЭРГУ-600-2, показывают, что амплитуда электрического поля, возбуждаемого на высоте 70 км излучающим диполем установки, может достигать 10 мкВ/м, а длительность его импульса – около 0.5–1.0 с. Данные параметры поля соответствуют возмущениям

от других источников электромагнитного загрязнения окружающей среды (ЛЭП и ЗЕВС), зарегистрированных на спутниках DEMETER и CSES. Амплитуда возмущения магнитного поля на поверхности Земли на частоте 1 Гц и расстоянии 5–10 км от источника составляет до 5 нТл, что удовлетворительно согласуется с полевыми измерениями вариаций геомагнитного поля во время работы установки ЭРГУ-600-2 и свидетельствует о возможности использования предложенной упрощенной математической модели для оценки электромагнитного загрязнения окружающей среды излучающими заземленными диполями.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (ИЗМИРАН – № 1021060808637-6-1.3.8; ОИВТ РАН – № 075-00269-25-00, ИДГ РАН – № 125012700824-4; ИС РАН – № 1021052806454-2-1.5.1).

### Список литературы

- Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А., Лисимов М.О. Технология активного электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах Северного Тянь-Шаня // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102. № 2–3. С. 40–62. <https://doi.org/10.21455/std2023.2-3-2>
- Вольхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В. и др. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М. : Наука. 1993. – 158 с.
- Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: точные решения. М. : Физматлит. 1995. – 560 с.
- Имашев С.А., Рыбин А.К. Сейсмические и геоакустические отклики земной коры на зондирования мощными электрическими импульсами на территории Бишкекского геодинамического полигона // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102. № 2–3. С. 63–88. <https://doi.org/10.21455/std2023.2-3-3>
- Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л., Проненко В.А. Наблюдения излучения линий электропередач в околоземном пространстве // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 5. С.706–711. <https://doi.org/10.7868/S0016794015050089>
- Лазарева Е.А., Имашев С.А. Вариации полного вектора геомагнитного поля во время пусков электроразведочной генераторной установки (ЭРГУ-600-2): Сборник материалов XIII Международной конференции молодых ученых и студентов (Бишкек, 28–30 апреля 2021 г.). Бишкек : ФГБУН ИС РАН в г. Бишкеке. 2021. С. 107–112.
- Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Климов С.И. Электромагнитное загрязнение околоземного космического пространства излучением ЛЭП // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 111–119. <https://doi.org/10.12737/szf-73202107>
- Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона. В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания (22–24 июня 2010 г., Москва). М. : ГЕОС. 2010. С. 316–325. <https://elibrary.ru/twjoev>
- Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А. Электромагнитные поля в верхней ионосфере от горизонтального крайне низкочастотного наземного излучателя конечной длины // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2022. Т. 65. № 9. С. 697–712. [https://doi.org/10.52452/00213462\\_2022\\_65\\_09\\_697](https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_09_697)
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 13th generation // Earth Planets Space. 2021. Vol. 73 (49). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Bladel J.V. Electromagnetic fields /2nd ed. Hoboken N. J. IEEE :Wiley-Interscience. 2007. – 1155 p.
- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. Generation of artificial ULF/ELF electromagnetic emission in the ionosphere by horizontal ground-based current system // J. Geophys. Res. Space Physics. 2023. Vol. 128. P. e2023JA031590. <https://doi.org/10.1029/2023JA031590>
- Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. Table of integrals, series, and products / 7th ed. London : Elsevier Academic Press. 2007. – 1171 p.
- Parrot M. DEMETER observations of manmade waves that propagate in the ionosphere // Comptes Rendus Physique. 2018. Vol. 19. P. 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.02.001>
- Pilipenko V.A., Parrot M., Fedorov E.N., Mazur N.G. Electromagnetic Field in the Upper Ionosphere from ELF Ground-Based Transmitter // J. Geophys. Res. Space Physics. 2019. Vol. 124(10). P.8066–8080. <https://doi.org/10.1029/2019JA026929>

*Pilipenko V., Zhao S., Savelieva N., Mazur N., Fedorov E., Ma Z.* ELF emission in the topside ionosphere from the ZEVS transmitter detected by CSES satellite // *Advances in Space Research*. 2024. Vol. 74 (10). P. 4937–4947. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.07.074>

*Volland H.* Atmospheric electrodynamics. New York : Springer-Verlag. 1984. – 205 p.

## **ELECTROMAGNETIC SIGNAL PROPAGATION INTO IONOSPHERE FROM THE RADIATING GROUNDED DIPOLE OF THE ERGU-600-2 ELECTRIC PROSPECTING GENERATOR FACILITY (NORTHERN TIEN SHAN)**

© 2025 V. M. Sorokin<sup>1</sup>, A. K. Yaschenko<sup>1</sup>, V. A. Novikov<sup>2,3,\*</sup>, S. A. Imashev<sup>4</sup>, E. A. Lazareva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia*

<sup>2</sup>*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan*

*\*E-mail: novikov@ihed.ras.ru*

The physical mechanism of propagation of the electromagnetic field disturbance generated by the electric prospecting generator facility ERGU-600-2 located at the Bishkek geodynamic test site of the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek (Kyrgyzstan) into the lower ionosphere is investigated. Within the framework of a simplified model of the medium and the radiation source (grounded dipole powered by the ERGU-600-2 facility), analytical expressions were obtained for the frequency and spatiotemporal distributions of the electromagnetic field components. The numerical results demonstrate that the amplitude of the electric field disturbance in the ULF range at an altitude of 70 to 100 km reaches several  $\mu\text{V}/\text{m}$ . To verify the numerical results on the territory of the Bishkek geodynamic test site, field measurements of the full geomagnetic field vector were carried out at various distances from the radiating dipole during the ERGU-600-2 operation sessions. The results of field measurements are consistent with the results of numerical studies, which allows to apply the proposed numerical method for assessing the electromagnetic pollution of the environment during the operation of man-made sources such as the ERGU-600-2 + dipole system.

**Keywords:** electrical prospecting facility, grounded radiating dipole, electromagnetic field, ionosphere, full geomagnetic field vector.